

PROCESADO DIGITAL DE SEÑALES ULTRASÓNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS DINÁMICAS EN MATERIALES ROCOSOS

Autores: Beatriz Calleja⁽¹⁾, Luis Mariano del Río⁽¹⁾, José Luis San Emeterio⁽²⁾

(1) Dpto. Física Aplicada. Escuela Politécnica. UEx. Cáceres. España. lmderio@unex.es

(2) Dpto. Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas Instituto de Acústica. CSIC. Madrid. España.
jluis@ia.cetef.csic.es

Resumen

En este trabajo se describe la utilización de técnicas ultrasónicas para la determinación de constantes elásticas de muestras rocosas, en particular granitos. Se han utilizado técnicas de transmisión (through transmission) y parejas de transductores de 50 kHz para ondas longitudinales y de 100 kHz para ondas transversales para la medida de los tiempos de tránsito y velocidades correspondientes. La medida de la velocidad de las ondas ultrasónicas transversales presenta especial dificultad por la generación simultánea de ondas longitudinales de menor amplitud que se solapan con el primer tren de ondas transversales. Se ha desarrollado una herramienta en lenguaje MATLAB que incluye algoritmos de procesamiento de señales para realizar una mejor interpretación de las trazas digitalizadas (que incluyen reflexiones, conversiones de modo y reverberaciones en las superficies de las muestras) y facilitar la estimación del tiempo de vuelo de cada tipo de onda, mediante diversos algoritmos basados en análisis espectral, filtrado digital y transformada de Hilbert. Utilizando transductores de ondas transversales se ha medido simultáneamente la velocidad de las ondas longitudinales y transversales.

Palabras-clave: granitos, ultrasonidos, procesamiento digital de señales, MATLAB, constantes elásticas.

Abstract

Ultrasonic techniques have been used in this work for obtaining the elastic constants in granite rocks. In particular, through transmission techniques, with ultrasonic transducers pairs of 50 kHz for longitudinal waves and 100 kHz for shear waves, have been used for the measurement of transit times and corresponding velocities. The measurement of ultrasonic shear waves velocities is particularly difficult because of the simultaneous generation of lower amplitude longitudinal waves which overlap the first arriving transversal wave. A MATLAB program has been developed for a better analysis and interpretation of the digitized ultrasonic traces (which include reflection, conversion of modes and reverberation at the different surfaces of the granite samples) and for a better estimation of different transit times. Signal processing algorithms for spectral analysis, digital filtering and envelop evaluation of different components of the ultrasonic trace, are included. Using the shear wave transducers pair, the longitudinal and shear wave velocities have been measured simultaneously.

Keywords: granites, ultrasonics, digital signal processing, MATLAB, elastic constants

1 Introducción

En los últimos tiempos, la importancia de la industria de los materiales rocosos ha experimentado un aumento substancial, sobre todo en sectores tan significativos como el de la construcción, en el que la Roca Ornamental, y en concreto el granito, juega un papel principal. El empleo de los ultrasonidos para la evaluación y caracterización de distintos materiales es una práctica habitual empleada con frecuencia para la correcta determinación de las propiedades físico-mecánicas de estas rocas. En este sentido, el procesamiento digital de las señales ultrasónicas procedentes de la generación-recepción de este tipo de ondas a través de las muestras graníticas, nos proporciona una idea acerca de los distintos fenómenos ocurridos durante la transmisión de los ultrasonidos a través de un material.

Nuestro equipo de investigadores de la Universidad de Extremadura (UEX) y del Instituto de Acústica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) han realizado un estudio sobre 9 muestras procedentes de 7 variedades de granito distintas [1], almacenando las trazas ultrasónicas procedentes de la transmisión de los distintos tipos de ondas a través de tales muestras. El objetivo es analizar con mayor profundidad los fenómenos asociados a la transmisión de estas ondas, realizando un estudio de distintas técnicas a la hora de establecer el tiempo de llegada de un tren de ondas ultrasónico. Para ello, con el uso del software *MATLAB*, hemos desarrollado herramientas basadas en algoritmos como la Transformada de Fourier, el filtrado digital o la Transformada de Hilbert, que nos facilitan este examen de las señales ultrasónicas digitalizadas.

1.1 Descripción del sistema de medida

La determinación de constantes elásticas dinámicas se realiza a partir de la medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales y transversales en las muestras de granito utilizadas. Para ello empleamos equipos ultrasónicos A-Scan, junto con transductores específicos de ondas longitudinales y transversales de 50 y 100 kHz respectivamente. El equipo de generación-recepción de ultrasonidos empleado para tal fin es un A-Scan *USM 23LF* de *Krautkramer*, junto con los palpadores de 50 kHz de onda longitudinal B 0.05 E/S de *Krautkramer* y los palpadores de 100 kHz de onda transversal V1548 de *Panametrics*. Este equipo se conecta a través de un cable serie RS-232 a un PC, y también a un osciloscopio digital *Tektronix TDS 220* con los cables y sondas necesarias (véase *Figura 1*). El osciloscopio será el encargado de visualizar y almacenar las trazas ultrasónicas procedentes de los transductores emisor y receptor de ultrasonidos, obtenidas de la transmisión de los mismos entre uno y otro transductor en caras enfrentadas de las muestras objeto de estudio. De esta forma, por cada pareja de caras de una misma muestra obtendremos tres trazas distintas, repitiendo la operación en todas las direcciones de las muestras. Las muestras analizadas son especímenes cúbicos, de dimensiones 20x20x20 cm³.

A partir de las trazas ultrasónicas adquiridas, con los transductores de ondas longitudinales y transversales, podemos establecer las velocidades de propagación ultrasónicas mediante la determinación más precisa posible del tiempo de llegada de cada tipo de onda. Mientras que la onda longitudinal, debido a su mayor velocidad, se determina a partir de la primera llegada (first arriving signal) de la onda ultrasónica al receptor, la llegada de la onda transversal resulta más compleja, al solaparse con el tren de ondas longitudinal, que también se propaga a través del material por conversión de modo de la primera.

La identificación del primer tren de ondas transversales tiene como base la distinta naturaleza de las ondas longitudinal y transversal, así como las propias características del transductor dadas por el fabricante. Según éste, este tipo de palpador ofrece teóricamente un ratio de la onda longitudinal con respecto a la transversal por debajo de -30 dB, aunque en la práctica los ratios son menores, por lo que

ambas ondas se superponen en la llegada [2]. En la *Figura 2* podemos apreciar una traza típica del palpador de onda transversal de 100 kHz, en el que se puede apreciar el solapamiento entre ambos tipos de ondas.



Figura 1- Dispositivo experimental para la medida del tiempo de vuelo de onda transversal

Ahora bien, la determinación del tiempo de vuelo de la señal a partir de la traza ultrasónica correspondiente puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas. Algunas de estas técnicas son, por ejemplo, tomar como referencia el inicio del pico con respecto a la desviación del eje temporal, el valor del 10% de la amplitud de dicho pico, o el valor de cruce por cero con el eje del tiempo después del primer pico [3]. Otra posibilidad sería tomar el corte de la tangente en el punto elegido (10%, 20%) con el eje temporal [4], o también se podría tomar el 25% del valor de la amplitud del pico [5]. De entre todos los métodos posibles, el empleado por nosotros en este trabajo se basa en la estimación del tiempo de tránsito de la onda ultrasónica tomando como referencia el inicio del pico con respecto a la desviación del eje temporal. Esto evita claramente la dependencia del tiempo de vuelo con la frecuencia de los palpadores, tal como hemos comprobado [6].

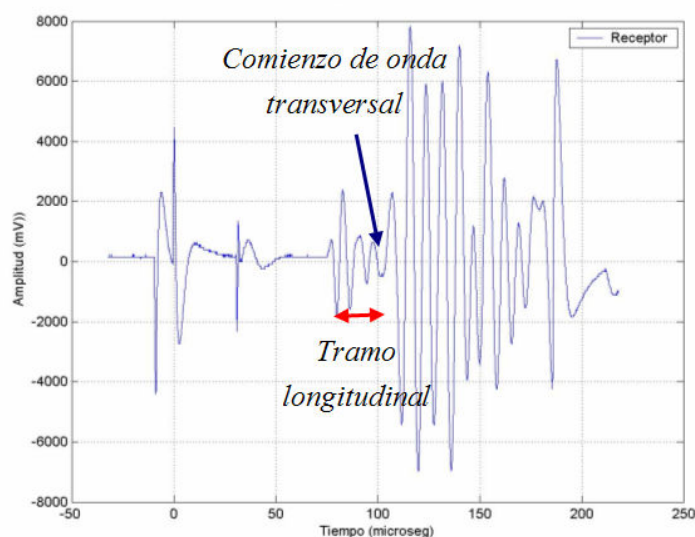


Figura 2- Traza temporal procedente de transmisión con palpador de onda transversal

En estudios previos, hemos determinado los valores de las velocidades analizando directamente las señales originales, estimando el tiempo de vuelo a partir del citado inicio del pico (véase *Figura 2*). Como puede verse, el solapamiento entre las señales de las ondas transversales y longitudinales hace

difícil la identificación del citado punto de inicio [7] [8] [9]. Por ello, con el objetivo de profundizar en: a) el análisis de los complejos fenómenos de propagación ultrasónica en estas muestras de dimensión finita, en las que se superponen distintos modos de propagación así como reflexiones y reverberaciones en las superficies externas; y b) la determinación precisa de los tiempos de vuelo de los distintos tipos de ondas ultrasónicas, hemos desarrollado una aplicación en lenguaje *MATLAB* que incluye una interfaz de usuario y algoritmos de procesamiento digital de señales que pasamos a describir brevemente en los siguientes apartados.

1.2 Algoritmos para el procesamiento digital de señales ultrasónicas

1.2.1 Transformada Discreta de Fourier

La Transformada de Fourier ha sido, es y continuará siendo una de las herramientas más ampliamente utilizadas para representar las señales estacionarias en el plano de la frecuencia [10]. Se basa en el hecho de que toda señal puede ser reconstruida a partir de la suma de sinusoides cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, eligiendo las amplitudes y fases adecuadas.

Sea $x(t)$ una señal en el dominio del tiempo, se define la Transformada de Fourier de x , denotada como $X(w)$, como la función:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

que está definida en todo \Re y toma valores complejos. La Transformada $X(w)$ representa la señal en el plano de la frecuencia, donde las funciones base son senos y cosenos (exponencial compleja), sin proporcionar información temporal (duración infinita de las funciones base), por lo que proporciona una manera alternativa de representar la información de una señal $x(t)$.

Dado que las señales con las que trataremos han sido digitalizadas previamente, hemos de adaptar la ecuación (1). Ahora la señal está formada por una secuencia de N muestras tomadas a intervalos regulares separados en $T=1/f_m$, siendo f_m la frecuencia de muestreo.

La Transformada discreta de Fourier permite, por tanto, transformar una secuencia de datos, obtenida al muestrear la señal continua, al dominio discreto de la frecuencia. En este caso, la expresión que define la Transformada directa para una secuencia de N puntos es:

$$X(n) = \sum_{k=0:N-1} x(k)e^{\frac{-2\pi jkn}{N}} \quad (2)$$

con valores de n entre 0 y $N-1$.

1.2.2 Filtrado digital

Existen dos tipos básicos de implementaciones a la hora de realizar filtros digitales: filtros FIR y filtros IIR. Mientras que la salida de los filtros tipo FIR sólo depende de valores de entrada actuales y anteriores, en el caso de los filtros IIR la salida depende, además, de valores anteriores de la salida que son almacenados y realimentados, siendo definidos a través de la ecuación en diferencias [11]:

$$\sum_{n=0}^N a_n y(k-n) = \sum_{m=0}^M b_m x(k-m) \quad (3)$$

en la que los coeficientes del filtro vienen ahora determinados por a_n y b_m . El orden del filtro será el máximo de los valores N y M .

Las ventajas de los filtros IIR frente a los FIR es que pueden conseguir la misma respuesta en frecuencia con un menor número de coeficientes, por lo que se emplea menos tiempo en la realización de los cálculos. La única desventaja es que al presentar polos en su función de transferencia, pueden llegar a ser inestables, introduciendo desfases en la señal que distorsionan la respuesta en frecuencia del filtro.

En nuestro caso, la realización de los filtros implementados durante el tratamiento de la señal ultrasónica ha sido llevada a cabo con una estructura tipo IIR, debido, además de las razones ya expuestas, a que un filtro IIR tiene lóbulos laterales más pequeños en la banda de rechazo que un FIR con el mismo número de parámetros. Debido a esto, si la distorsión en fase es pequeña, es preferible utilizar un filtro IIR, y esto es porque su implementación requiere menos parámetros, menos memoria y menor complejidad computacional.

Dentro de las diversas opciones que se nos presentan en el diseño de un filtro IIR, existen tres formas fundamentales: filtros *Butterworth*, *Chebyshev* o elípticos. Durante la realización de la aplicación informática desarrollada en este trabajo, nos decantamos por el primer tipo de filtro, pues es el que mejor se ajusta a nuestras necesidades en cuanto a la respuesta en frecuencia. Esto es porque, aunque presentan una caída menos pronunciada en la transición de la banda de paso a la banda de rechazo, presentan una ganancia constante en la banda de paso. En el caso de *Chebyshev*, existe un pequeño rizado en dicha banda, lo cual afecta de cierta manera a las componentes frecuenciales de la señal original que deja pasar el filtro.

1.2.3 Transformada de Hilbert

La Transformada de Hilbert es un algoritmo matemático que permite una representación más precisa de la dinámica temporal de la señal ultrasónica. La aplicación de la Transformada de Hilbert tiene como resultado una representación de la envolvente (forma acústica) de la onda original.

La Transformada de Hilbert $\hat{R}(t)$ de una función dependiente del tiempo $R(t)$ se define a partir de la expresión [12]:

$$\hat{R}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(u)}{t-u} du \quad (4)$$

Esta Transformada tiene una función de transferencia causal que se comporta como un filtro. La Transformada de Hilbert de una señal se obtiene desfasando -90° todas sus componentes espectrales. De esta manera, la envolvente $E(t)$ de la función en el tiempo puede calcularse con la expresión:

$$E(t) = \sqrt{R(t)^2 + \hat{R}(t)^2} \quad (5)$$

Esta operación da como resultado una supresión del ruido de menor amplitud de la señal ultrasónica, así como un aumento del contenido de mayor amplitud de la misma. Por lo tanto, la Transformada de

Hilbert puede emplearse para la estimación del inicio de la señal o la detección de la señal en general.

1.3 Herramienta informática desarrollada con MATLAB

La herramienta desarrollada incluye una interfaz de usuario sencilla y realiza diferentes operaciones sobre las trazas ultrasónicas adquiridas, que normalmente presentan una estructura con múltiples pulsos correspondientes a distintos tipos de propagación y a reflexiones / reverberaciones en las superficies externas de las muestras. Primero, presenta las trazas temporales de cada muestra y obtiene su Transformada de Fourier (mediante el algoritmo *FFT*), de forma que se puede realizar un estudio detallado de las señales captadas por el palpador receptor, tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. Una vez visualizadas en el dominio del tiempo las trazas ultrasónicas procedentes de los palpadores emisor y receptor, el usuario es preguntado a cerca del número de tramos o trazas que desea analizar, pudiendo delimitar de forma manual cada uno de los trenes de onda escogidos pertenecientes al canal del receptor. Así, una vez delimitados los tramos a estudiar, podemos ver sus correspondientes Transformadas de Fourier, con lo que podemos observar el contenido en frecuencia de cada tramo seleccionado. Una vez visualizada la *FFT* de cada tramo, se pueden obtener con la máxima precisión la frecuencia y amplitud de los máximos en el espectro en frecuencias.

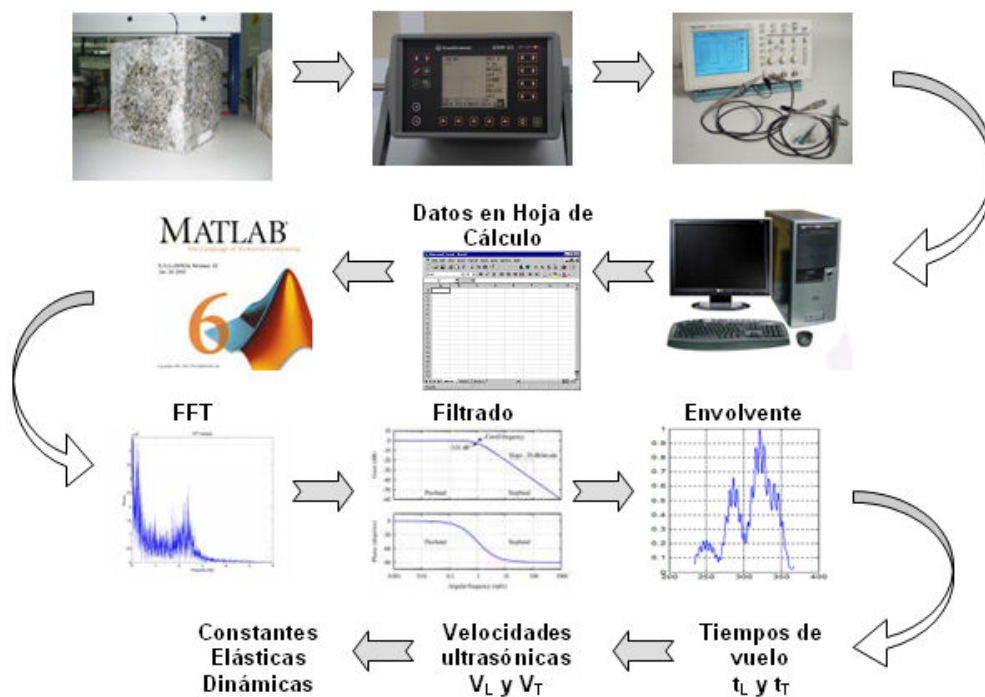


Figura 3- Resumen del proceso de medida seguido en la determinación de las variables ultrasónicas

Además de esto, partiendo de la traza temporal de la señal ultrasónica en recepción, se permiten distintos tipos de filtrado sobre dicha señal (paso bajo, paso alto, paso banda y elimina banda) definiendo una o dos frecuencias de corte. En cualquiera de los cuatro casos, obtenemos la señal resultante del filtrado en el dominio del tiempo, de forma que el programa nos permite conocer el valor numérico de la/s frecuencia/s de corte seleccionada/s. La aplicación de determinados tipos de filtros puede dar lugar a señales en las que la transición entre el tren de onda longitudinal y transversal se distinguen con mayor claridad. En este sentido la obtención la envolvente de las señales filtradas puede emplearse como una herramienta de gran potencia para el cálculo de los tiempos de vuelo de las

citadas ondas. Esto se lleva a cabo a través de la Transformada de Hilbert. En la aplicación desarrollada, el usuario determina en la traza temporal original el inicio del pulso de emisión; mientras que de la envolvente de la señal filtrada se elige primer y segundo mínimo, que se corresponden con el inicio del tren de ondas longitudinal y transversal respectivamente. De esta forma el programa es capaz de ofrecer tiempos de vuelo de las citadas ondas, siempre y cuando las señales colectadas procedan del uso de los palpadores de onda transversal. Un resumen del proceso implementado puede observarse en la *Figura 3*.

2 Resultados

2.1 Análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia

Como ya comentamos, una de las posibilidades que nos ofrece la aplicación desarrollada en *MATLAB* es la de realizar un estudio más o menos exhaustivo de la información contenida en las trazas ultrasónicas procedentes de la transmisión del ultrasonidos a través de los granitos estudiados, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

Para este análisis, partimos de la señal en el dominio del tiempo de los canales del transmisor y del receptor para cada muestra de granito analizada, representando dichas señales en el dominio temporal, al tiempo que se permite al usuario realizar la Transformada de Fourier (*FFT*) de la señal recibida en el palpador receptor. Además, el programa permite seleccionar de forma manual los distintos trenes de onda de la señal en recepción, de forma que podemos conocer la amplitud y frecuencias de los máximos en el espectro de cada parte de la señal objeto de estudio. Esto resulta interesante en el sentido en que nos permite hacernos una idea de cuales son las componentes frecuenciales predominantes en las señales ultrasónicas analizadas. En la *Figura 4* mostramos un ejemplo de un análisis realizado para una traza procedente del uso de palpador de onda longitudinal de 50 kHz.

Del análisis de la señal mostrada en la *Figura 4*, así como en los demás casos de transmisión de onda longitudinal, observamos que la frecuencia a la que corresponde el pico de mayor amplitud en la *FFT* de la onda completa se sitúa en torno a los 36 kHz, mientras que al realizar la *FFT* de cada tren de ondas, la Transformada de Fourier del primer tramo temporal da como resultado una única componente en frecuencia ubicada en torno a los 50 kHz. Esto parece indicar que efectivamente estamos en lo cierto al afirmar que la primera llegada de la onda al palpador receptor se corresponde con la llegada de la onda longitudinal, con frecuencia nominal de 50 kHz según los palpadores empleados. Por su parte, del estudio de las trazas procedentes de la transición de onda transversal de 100 kHz da como resultado espectros en frecuencia cuyo contenido se extiende aproximadamente hasta los 180 kHz, con máximos en frecuencia en torno a los 130 kHz que se combinan con otros máximos procedentes de la transmisión de la onda longitudinal (generada por conversión de modo).

En este sentido, el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia resulta muy útil en el estudio de las señales ultrasónicas, ya que en ocasiones la información se encuentra dispersa en el dominio del tiempo, por lo que la representación en frecuencias puede aportar información adicional, a la vez que facilitar el estudio de la señal. De esta manera, lo que en el dominio del tiempo se muestra como intersecciones de ondas, espurios o anomalías en la amplitud de las trazas ultrasónicas, se traduce en ocasiones en el dominio de la frecuencia en picos de mayor o menor potencia situados en frecuencias

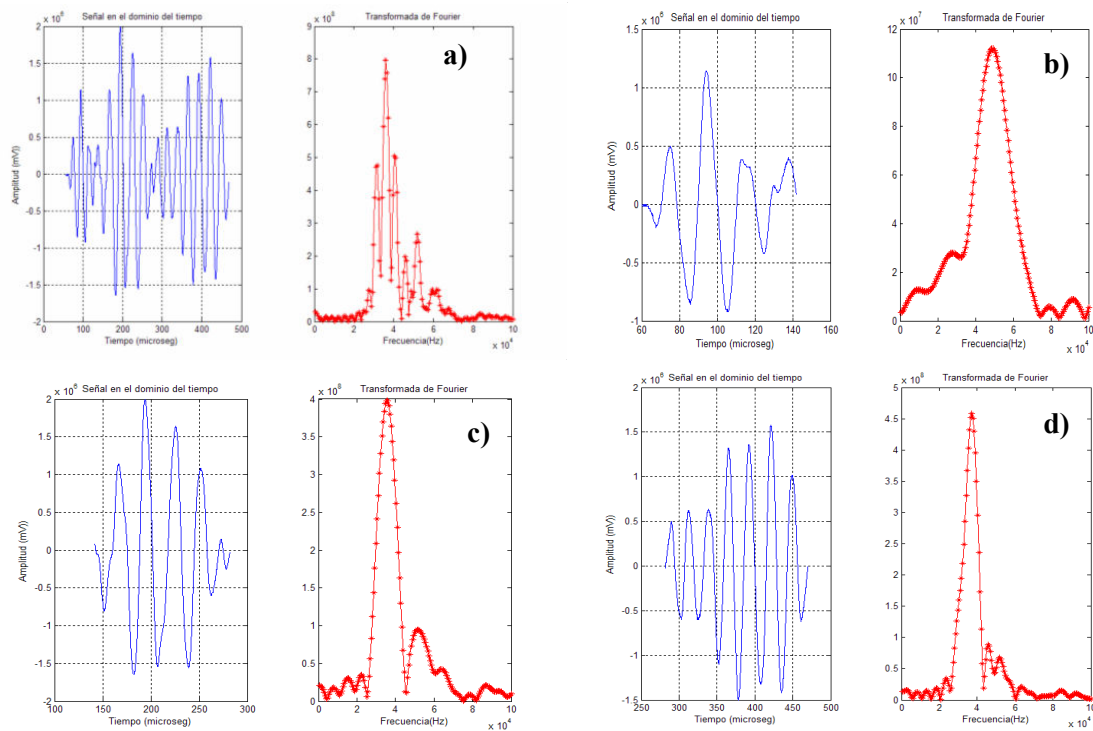


Figura 4- Representación en el tiempo y en frecuencia para los tramos de señal de la muestra AJ_CC'_1 a) traza completa b) traza L1 c) traza L2 y d) traza L3

que no se corresponden con múltiplos de la frecuencia del palpador empleado. Esto puede dar una idea de los fenómenos que tienen lugar en el palpador receptor, al estar sometido de forma continua a distintas excitaciones, como las procedentes de rebotes y reflexiones en las distintas caras de la muestra granítica correspondiente, o incluso a la formación y transmisión de ondas de tipo superficial, hechos que pueden explicar estas anomalías en las trazas ultrasónicas capturadas.

2.2 Filtrado y envolvente

La aplicación desarrollada para el procesamiento de ondas ultrasónicas nos ofrece también la posibilidad de, además de lo visto hasta el momento, filtrar la señal procedente del palpador receptor. El resultado de aplicar los diversos tipos de filtros tiene efectos diversos, en función de la señal a filtrar, la frecuencia de corte escogida y como no, del tipo de filtro aplicado. Aunque el procesamiento se ha aplicado indistintamente a trazas longitudinales (50 kHz) como transversales (100 kHz), nos centraremos en el segundo tipo de ondas de las que, como sabemos, podemos obtener un valor para el tiempo de vuelo de la onda longitudinal (la que se produce por conversión de modo) y la onda transversal.

En la *Figura 5* se muestra como ejemplo una traza obtenida con un transductor de onda transversal a la que se le ha aplicado diversos tipos de filtros. Mientras que el filtrado paso bajo y el elimina banda no parecen proporcionar información relevante, con el filtrado paso alto y paso banda obtenemos señales

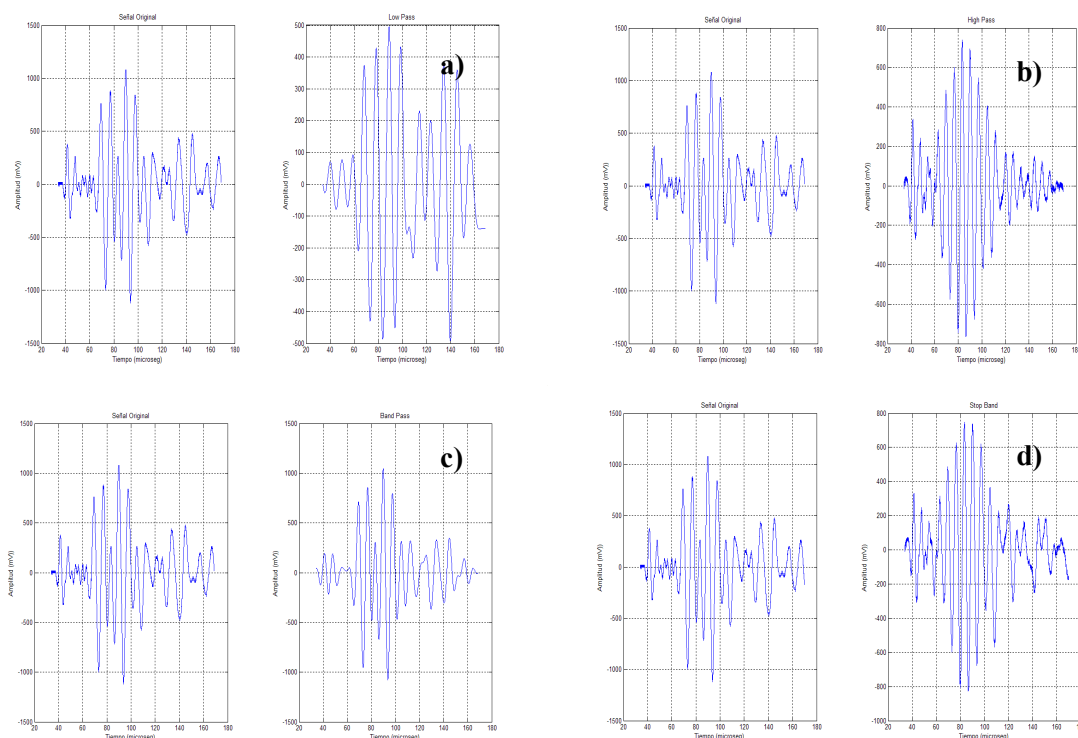


Figura 5- a) Resultado de filtrar la traza GF_AA'_1 con paso bajo a 122.70 kHz, b) paso alto a 122 kHz, c) paso banda de 80.53 kHz a 182.14 kHz y d) elimina banda de 80.53 kHz a 122.00 kHz

en las que se elimina de manera considerable los espurios de la señal, y, lo que resulta aún de mayor interés, se acentúan las diferencias entre los distintos trenes de onda que aparecen en la señal, hecho que puede ser especialmente relevante en la determinación del tiempo de llegada de la onda transversal al palpador receptor. Este hecho es especialmente notable en el caso del filtrado paso banda, por lo que emplearemos la señal filtrada de esta manera para la obtención de la envolvente.

En la *Figura 6* se muestran las envolventes de una de las trazas estudiadas obtenidas con ayuda de la aplicación que hemos desarrollado. Del análisis de estas formas de onda podemos decir que el aplicar la Transformada de Hilbert sobre las señales previamente filtradas ofrece una buena herramienta para la determinación de los distintos frentes de onda de la señal. Podemos apreciar en cada una de las gráficas de la citada figura, cómo existe un primera envolvente con una amplitud claramente inferior, previo a otro segundo tren de ondas de más altura, destacando el hecho de que la intersección entre el primero y el segundo se hace más nítida en el caso de la señal filtrada, tal y como se señala en las gráficas de la citada figura. De esta manera, una vez visualizada la envolvente de la onda completa, el usuario puede determinar más fácilmente el tiempo de vuelo de la onda transversal, que se corresponde con el primer mínimo de la onda, mientras que el inicio de la primera envolvente nos sirve para determinar el tiempo de vuelo de la onda longitudinal.

Siguiendo el procedimiento previamente detallado se han obtenido los tiempos de vuelo (correspondientes tanto a ondas longitudinales como transversales) en varias trazas adquiridas con los transductores de onda transversal de 100 kHz.

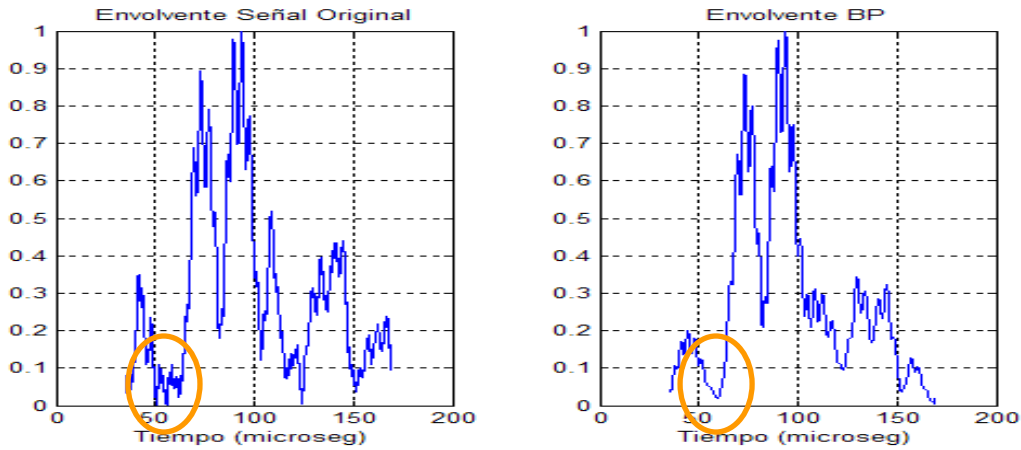


Figura 6- Envolvente de las señales previamente filtradas con filtro paso banda de la muestra GF_AA'_1

Conocidas las dimensiones de las muestras, se determinan las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales (usando el mismo transductor de 100 kHz), así como el cociente característico $R=V_T/V_L$, tal como se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1- Valores de velocidad de onda longitudinal, transversal y relación R entre ellas

MUESTRA	V_L (m/s)	V_T (m/s)	R
AJ1_CC'_2	5030 ± 30	2572 ± 13	0,511
AP_BB'_1	6170 ± 23	3116 ± 11	0,505
AZ1_AA'_3	4890 ± 40	2969 ± 21	0,608
AZ2_BB'_3	5430 ± 30	3106 ± 17	0,572
BM_AA'_2	5250 ± 30	2977 ± 15	0,567
FP_AA'_2	4340 ± 30	2953 ± 17	0,680
GF_AA'_1	5876 ± 24	3165 ± 13	0,539
NV1_CC'_2	7280 ± 40	4250 ± 22	0,584
NV2_CC'_1	7150 ± 40	3652 ± 19	0,511

Hemos comparado los valores de la *Tabla 1* con los obtenidos de manera directa, sin tratamiento digital de señales, usando los transductores de ondas longitudinales para V_L y los de ondas transversales para V_T . En general, los valores de ambas velocidades obtenidos mediante filtrado y determinación de envolvente son mayores, en torno a un 10%, que los obtenidos de forma directa a partir de las señales originales. Por otra parte, tal como puede apreciarse en la *Figura 7*, existe una fuerte correlación lineal entre los valores de las velocidades longitudinales de las ondas determinadas mediante ambas técnicas. Igual sucede para el caso de las ondas transversales, obteniéndose un ajuste a la ecuación lineal

$$V_{Tdsp} = (1,43 \pm 0,35) * V_{Lkr} + (-990 \pm 1010)$$

con $R^2=75,42$ %. Consultando los valores disponibles en la bibliografía ([13], [14], [15], [16]) podemos decir que los valores encontrados son compatibles con los citados por otros autores.

Finalmente, las constantes elásticas dinámicas obtenidas a partir de V_{Ldsp} y V_{Tdsp} se muestran en la *Tabla 2* [6]. Tal como puede apreciarse, los mayores valores de constantes elásticas se corresponden

con las muestras que cuentan con las velocidades de propagación más elevadas (NV) y las de menores velocidades poseen valores menores de las citadas constantes (AJ).

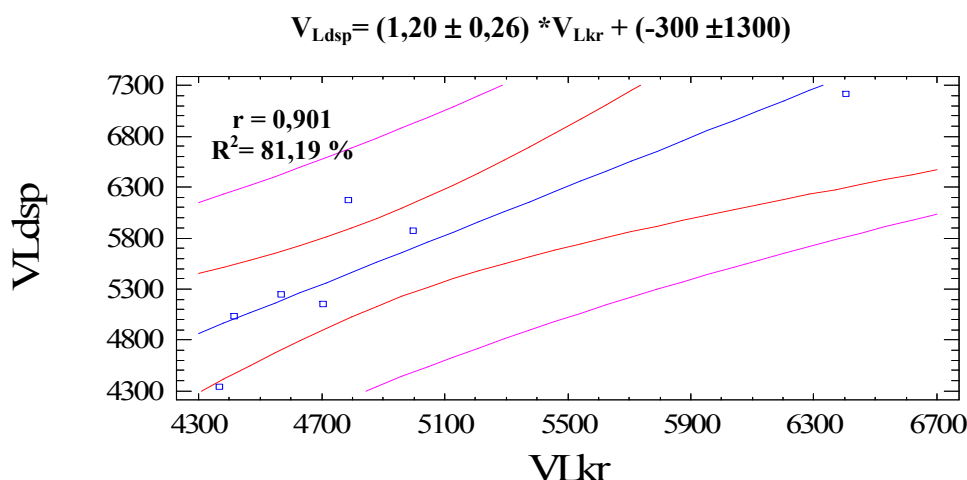


Figura 7- Regresión lineal entre la velocidad longitudinal obtenida con el tratamiento digital de la señal VLdsp frente a la obtenida mediante técnica de transmisión directa con Krautkramer VLkr

Tabla 2- Valores de constantes elásticas dinámicas obtenidas a partir de los valores de la Tabla 1

MUESTRA	E (GPa)	G (GPa)	μ	k (GPa)	λ (GPa)
AJ1_CC' 2	$45,8 \pm 0,9$	$17,31 \pm 0,12$	$0,323 \pm 0,008$	$43,1 \pm 0,6$	$31,6 \pm 1,2$
AP_BB' 1	$68,4 \pm 1,0$	$25,74 \pm 0,13$	$0,329 \pm 0,006$	$66,6 \pm 0,7$	$49,4 \pm 1,3$
AZ1_AA' 3	$57,7 \pm 2,2$	$23,89 \pm 0,24$	$0,207 \pm 0,015$	$32,8 \pm 1,0$	$16,8 \pm 1,8$
AZ2_BB' 3	$65,7 \pm 1,8$	$26,14 \pm 0,21$	$0,257 \pm 0,011$	$45,0 \pm 0,9$	$27,6 \pm 1,7$
BM_AA' 2	$58,4 \pm 1,4$	$23,13 \pm 0,16$	$0,263 \pm 0,009$	$41,2 \pm 0,7$	$25,7 \pm 1,4$
FP_AA' 2	$49,1 \pm 2,0$	$22,93 \pm 0,18$	$0,070 \pm 0,014$	$19,0 \pm 0,6$	$3,7 \pm 1,2$
GF_AA' 1	$68,8 \pm 1,2$	$26,55 \pm 0,15$	$0,296 \pm 0,007$	$56,1 \pm 0,7$	$38,4 \pm 1,4$
NV1_CC' 2	136 ± 4	$54,7 \pm 0,4$	$0,242 \pm 0,010$	$87,8 \pm 1,7$	51 ± 3
NV2_CC' 1	$107,0 \pm 2,2$	$40,4 \pm 0,3$	$0,324 \pm 0,009$	$101,1 \pm 1,5$	74 ± 3

3 Conclusiones

Se han aplicado técnicas ultrasónicas de transmisión (through transmission) para la determinación de las constantes elásticas dinámicas de rocas ornamentales, en particular en varias muestras de granito de diversas variedades. Se ha utilizado un equipo *USM 23LF* de *Krautkramer*, junto con parejas de transductores de 50 kHz de onda longitudinal B 0.05 E/S de *Krautkramer* y parejas de transductores de 100 kHz de onda transversal V1548 de *Panametrics*. Las trazas ultrasónicas han sido transferidas a un ordenador para un procesamiento posterior. Se ha desarrollado una aplicación en lenguaje *MATLAB* que incluye una interfaz de usuario y algoritmos de procesamiento digital de señales, para un estudio de los complejos fenómenos de propagación ultrasónica en estas muestras graníticas de dimensión finita (en las que se superponen distintos modos de propagación así como reflexiones y reverberaciones en las superficies externas), y para la determinación precisa de los tiempos de vuelo de los distintos tipos de ondas ultrasónicas. Utilizando transductores de ondas transversales se ha medido simultáneamente

la velocidad de las ondas longitudinales y transversales. Los valores de las velocidades y constantes elásticas obtenidas tras aplicar las técnicas desarrolladas de filtrado y procesado digital son, en general, superiores a los determinados directamente a partir de las señales originales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de Juan José Tejado y María Isabel Mota, del Instituto de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC), así como a Felicísima López, José Luis Sánchez y María Isabel Peco de la Escuela Politécnica de Cáceres. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos de la Junta de Extremadura PR03B021 y CICYT. DPI2005-00124.

Referencias

- [1] INTROMAC, *Ensayos Normalizados de Granitos y Piedra Natural. Atlas de Rocas Ornamentales de Extremadura*, Ed. Junta de Extremadura, 2004.
- [2] Panametrics, Transducer Catalog, Normal Incidence Shear Wave Transducers, 2004
- [3] P. H. F. Nicholson and R. Strelitzki. *On the Prediction of Young's Modulus in Calcaneal Cancellous Bone by Ultrasonic Bulk and Bar Velocity Measurements*. Clin Rheumatol, Vol. 18, pp. 10–16. 1999.
- [4] M. NABI-BIDHENDH, M. S. KING. *A Computer-aided Method for Calculating P- and S-Wave Velocities in Rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 2, pp. 309-316, 1996
- [5] R Strelitzki, P H F Nicholson and J A Evans. *Low-frequency ultrasonic velocity measurements in human calcaneal trabecular bone*. Physiol. Meas. 18, pp. 119–127. Printed in the UK, 1995.
- [6] B. Calleja, *Aplicación de técnicas ultrasónicas para la determinación de las constantes elásticas de rocas ornamentales*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Extremadura. 2008
- [7] L. M. Del Río Pérez, F. López Muriel, B. Calleja Bello, M^a I. Mota López, J. J. Tejado Ramos, I. González Benito, J. L. San Emeterio Prieto, A. Ramos Fernández. *Aplicación de EnD mediante Ultrasonidos para la Determinación de las Constantes Elásticas Dinámicas en Piedra Natural*. Revista de la Asociación Española de EnD, 2005.
- [8] L.M. Del Río, F. López, B. Calleja, J.J. Tejado, M^a. I. Mota, I. González, J.L. San Emeterio, A. Ramos, Antonio; *Resonance-based acoustic technique applied to the determination of young's modulus in granites*. 19th Internacional Congress on Acoustics, Madrid September 2007.
- [9] L.M. Del Río, F. López, F.J. Esteban; J.J. Tejado, M^a. I. Mota, I. González, J.L. San Emeterio, A. Ramos, *Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain)*, Ultrasonics, 44, p.e1057-e1061, Dec 2006
- [10] Ullate L.G.; Martínez, Izquierdo, M.A.G.; Parrilla M. *Procesamiento Digital de señales ultrasónicas en END*. Instituto de Automática Industrial, CSIC. Madrid, España
- [11] J.G. Proakis, D.G. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales*, Ed. Prentice Hall
- [12] C. O. Jiménez *Procesamiento digital de señales sísmicas en entorno Matlab*. Instituto Geofísico de Perú.
- [13] ASTM D285-00, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, US 2000
- [14] R.E. Sheriff & L.P. Geldart, *Exploration Seismology*, capítulo 2. Cambridge. University Press, USA, 1995
- [15] K. Suzuki, M. Oda, T. Kuwahara and K. HIRAMA, *Material Property Changes in Granitic Rock During Long-Term Immersion in Hot-Water*, Engineering Geology, vol. 40, pp. 29-39, 1995.
- [16] J. Liao, T. Hu, Ch. Chang, *Determination of Dynamic Elastic Constants of Transversely Isotropic Rocks Using a Single Cylindrical Specimen*, Int. J. of Rock Mech. and Mining, vol. 34, N° 7, pp.1045-1054, 1997.